



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 101 55 492 A 1

⑯ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 02 B 6/13**  
G 02 B 6/125  
H 04 B 10/20

⑪ Aktenzeichen: 101 55 492.3  
⑫ Anmeldetag: 13. 11. 2001  
⑬ Offenlegungstag: 9. 10. 2003

DE 101 55 492 A 1

⑪ Anmelder:  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena, DE

⑫ Erfinder:  
Will, Matthias, 99094 Erfurt, DE; Nolte, Stefan, Dr.,  
30459 Hannover, DE

⑯ Entgegenhaltungen:  
WO 01 09 899 A1  
ELDADA;Louay,et.al.: Laser-Fabricated Low-Loss  
Single-Mode Raised-Rib Waveguiding Devices in  
Polymers. In: Journal of Lightwave  
Technology, Vol.14, No.7,July 1996;;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, sowie

verfahrensgemäß hergestellter Verzweiger

⑯ Damit sich bei einem Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, sowie verfahrensgemäß hergestellten Verzweigern, bei welchen in ein durch Lichteinstrahlung änderbares Material ein erster Wellenleiter und mindestens ein weiterer, von dem ersten Wellenleiter abzweigender Wellenleiter geschrieben wird, das Teilverhältnis zwischen den ver- oder abgezweigten Wellenleitern mit verbesserter Genauigkeit einstellen lässt, ist vorgesehen, daß bei dem Schreiben des mindestens einen weiteren Wellenleiters ein Teil der vor einem Verzweigungspunkt liegenden Strecke des ersten Wellenleiters ...

DE 101 55 492 A 1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere zur Herstellung eines Mehrfach-Strahlteilers, sowie verfahrensgemäß hergestellte Verzweiger.

[0002] Optische Nachrichtenübertragende bzw. -verarbeitende Systeme sowie die optische Datenverarbeitungs- und -speicherungseinrichtungen benötigen bestimmte Grundbausteine, wie beispielsweise optische Verzweiger, um Signale von zumindest einem Eingangs- auf mehrere optische Ausgangspfade verteilen zu können. Diese Verzweiger werden auch als Strahlteiler oder bei Verzweigung in N weitere Wege als N-fach-Strahlteiler bezeichnet. Die Qualität dieser Elemente ist wesentlich für die Ausbreitung von optischen Signalen, wobei besonders hohe Aufmerksamkeit den Wellenleiter-Strahlteilern zukommt, welche geführte optische Signale in N weitere Ausbreitungswege verzweigen.

[0003] Aus der WO 01/09899 A1 ist das direkte Schreiben von wellenleitenden Strukturen in ein Glassubstrat bekannt. Hierzu wird ein Femtosekundenlaserpuls in ein Silikat-Glas fokussiert, um dieses punktuell auf mehr als 1380 Kelvin zu erwärmen.

[0004] Die JP 09311237, die EP 797 112, EP 1 045 262 sowie die US 6,154,593 und US 5,978,538 beschreiben die Ausbildung optischer Wellenleiter in Glassubstraten.

[0005] Bei Wellenleiterverzweigern bestand jedoch das Problem, beim weiterführen des Wellenleiters in getrennte Richtungen, das Teilverhältnis der sich in den einzelnen abgezweigten Wellenleitern ausbreitenden Photonen bzw. der zu teilenden Lichtleistung exakt einzustellen. Bis dato wurde hierzu nach dem Schreiben eines ersten Wellenleiters von einem Verzweigungspunkt aus ein weiterer Wellenleiter geschrieben. Die hierbei erreichbaren Teilverhältnisse waren jedoch bisher recht unbefriedigend.

[0006] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen optischen Verzweiger bereit zu stellen, bei welchem sich das Teilverhältnis zwischen den ver- oder abgezweigten Wellenleitern mit verbesserter Genauigkeit einstellen lässt.

[0007] Diese Aufgabe wird auf überraschend einfache Weise bereits mit einem Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie mit einem optischen Verzweiger mit den Merkmalen des Anspruchs 18 und in einem Kommunikationssystem mit den Merkmalen des Anspruchs 19 erreicht.

[0008] Die Erfinder haben festgestellt, daß es höchst vorteilhaft ist, wenn bei dem Schreiben von mindestens einem weiteren Wellenleiter, welcher von einem ersten Wellenleiter abgezweigt wird, ein Teil der vor dem Verzweigungspunkt liegenden Strecke des ersten Wellenleiters überschritten wird.

[0009] Es ist weiterhin vorteilhaft, wenn bei dem Schreiben des mindestens einen weiteren Wellenleiters die vollständige, in dem durch Licht änderbaren Material liegende Strecke des ersten Wellenleiters bis zum Verzweigungspunkt überschrieben wird und der abgezweigte Wellenleiter ohne Unterbrechung dann weitergeschrieben wird.

[0010] Eine besonders bevorzugte Art des Schreibens der Wellenleiter umfaßt das Schreiben von Brechungsexponentenänderungen in einem durch Licht änderbaren Material.

[0011] Hierbei wurden besonders gute Wellenleiter und Teilverhältnisse dann erreicht, wenn während des Überschreibens des ersten Wellenleiters die Schreibgeschwindigkeit gegenüber der Schreibgeschwindigkeit des abgezweigten Teils des mindestens einen Wellenleiters erhöht wurde.

[0012] In ebenfalls vorteilhafter Weise konnte während des Überschreibens des ersten Wellenleiters die eingestrahlte Lichtleistung gegenüber der eingestrahlten Lichtleistung bei dem Schreiben des abgezweigten Teils vermindert

werden und konnte insbesondere bei einem N-fach Strahlteilers auf den Nten Teil vermindert werden. Die Änderung der eingestrahlten Lichtleistung wurde vorteilhaft durch eine Änderung der Wiederholungs- beziehungsweise Repetitionsrate eingestellt.

[0013] Besonders vorteilhafte durch Licht änderbare Materialien waren aus der Gruppe ausgewählt, welche Gläser, Kristalle und Glaskeramiken umfaßt, die bei einer Schreibwellenlänge im Bereich von 300 nm bis 1700 nm, besonders bevorzugt bei einer Schreibwellenlänge von ca. 400 nm, ca. 620 nm, ca. 800 nm, ca. 1060 nm und/oder ca. 1550 nm und insbesondere bei der Wellenlänge des geführten Lichtes vorzugsweise im Bereich von 1250 nm bis 1600 nm im wesentlichen transparent sind.

[0014] Bei einer ersten bevorzugten Ausführungsform wurde das Schreiben der Wellenleiter parallel zur Oberfläche des durch Licht änderbaren Materials vorgenommen und es entstand hierbei eine Gruppe, von in einer Ebene liegenden abgezweigten beziehungsweise verzweigten Wellenleitern, welche höchst vorteilhaft in weitere Oberflächenwellenleiter eines anderen optischen Substrats einkoppelbar waren.

[0015] Werden darüber hinaus beim Schreiben von zumindest einem Teil der Wellenleiter Abschnitte definiert, welche nicht parallel zu der Oberfläche des durch Licht änderbaren Materials verlaufen, kann hierdurch eine dreidimensionale Wellenleiterstruktur erzeugt werden, welche Licht in mehreren Ebenen verzweigt und folglich Wellenleiteraustrittsbereiche zur Verfügung stellt, die nicht in einer Ebene liegen, welches beispielsweise für mehrlagige Strukturen höchst vorteilhaft ist. Verrundete Übergangsbereiche vermeiden hierbei unerwünschte Streulichtanteile. Durch das Schreiben von Gruppen von Wellenleitern mit Abschnitten, die jeweils in einer gemeinsamen Ebene liegen, können mehrlagige Oberflächenwellenleitersubstrate auf sehr exakte Weise mit den abgezweigten beziehungsweise verzweigten Wellenleiternabschnitten verbunden werden.

[0016] Durch eine Korrektur der sphärischen Aberration, der den Wellenleiter schreibenden Optik in Abhängigkeit von der Tiefe des Wellenleiters in dem durch Licht änderbaren Material kann der jeweilige Wellenleiter auf sehr exakte Weise und mit sehr günstigem Streulicht Verhalten auch in verschiedenen Tiefen sogar bis zu einer Tiefe von ungefähr 4 cm geschrieben werden.

[0017] Auf besonders vorteilhafte Weise wurde die Korrektur der sphärischen Aberration mittels einer Schwarzschildoptik, eines Spiegels mit änderbarer Kontur, insbesondere änderbarer Krümmung von dessen Oberfläche vorgenommen.

[0018] Alternativ oder zusätzlich konnte dieses günstige Verhalten auch dadurch unterstützt werden, daß eine Anpassung der pro Puls eingestrahlten Energie in Abhängigkeit von der Tiefe des Wellenleiters vorgenommen wurde.

[0019] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von bevorzugten Ausführungsformen und unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen detaillierter beschrieben.

[0020] Es zeigen:

[0021] Fig. 1a eine Anordnung für das direkte Wellenleiterbeschreiben mit einer das Licht fokussierenden Optik, welche sich im wesentlichen parallel zu einer der Hauptoberflächen des transparenten zu beschreibenden Materials mit einer senkrecht zu dieser Hauptoberfläche verlaufenden Strahlrichtung bewegt,

[0022] Fig. 1b eine Anordnung für das direkte Wellenleiterbeschreiben mit einer das Licht fokussierenden Optik, welche sich im wesentlichen senkrecht zu einer der Hauptoberflächen des transparenten zu beschreibenden Materials mit einer Strahlrichtung parallel zu dieser Hauptoberfläche be-

wegt,

[0023] Fig. 2 Beispiele von Strahlteilern, bei welchen

[0024] Fig. 2a einen  $1 \times 2$ -Strahlteiler zeigt, dessen Arme

in einer Ebene liegen,

[0025] Fig. 2b einen  $1 \times N$ -Strahlteiler zeigt, dessen Arme

in einer Ebene liegen,

[0026] Fig. 2c einen  $1 \times 3$ -Strahlteiler zeigt, dessen Arme

nicht in einer Ebene liegen und

[0027] Fig. 2d einen  $1 \times N$ -Strahlteiler zeigt, dessen Arme

nicht in einer einzigen Ebene liegen,

[0028] Fig. 3 ein Beispiel für den Ablauf des Schreibens eines  $1 \times 2$ -Strahlteilers mit dessen dabei änderbaren Parametern,

[0029] Fig. 4 in deren oberem Teil eine Aufsicht auf einen  $1 \times 2$ -Strahlteiler und in deren unterem Abschnitt Intensitätsprofile von Lichtintensitäten an der Austrittsstelle der Wellenleiter,

[0030] Fig. 5 das Schreiben von Wellenleitern in verschiedenen Tiefen eines transparenten, durch Licht änderbaren Materials

[0031] Fig. 6 eine beispielhafte, zur tiefenabhängigen Korrektur der sphärischen Aberration einsetzbare Schwarzschildoptik.

[0032] Die Erfindung wird nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele und zunächst unter Bezugnahme auf die Fig. 1a und 1b detaillierter beschrieben.

[0033] Die im ganzen mit dem Bezugszeichen 1 versehene Anordnung zum Schreiben von Wellenleitern umfasst gemäß Fig. 1a eine fokussierende Optik 2, die das im wesentlichen parallele Strahlenbündel 3 eines Femtosekundenpulsasers, welcher in den Figuren nicht dargestellt, jedoch dem Fachmann auf diesem Gebiet bekannt ist, unter die Oberfläche des transparenten, durch Licht in dessen Brechungsindex änderbaren Materials 4 fokussiert.

[0034] Die fokussierende Optik 2, welche lediglich schematisch dargestellt ist, erzeugt einen Fokus 5 innerhalb dessen es zu punktuellen Brechungsindexänderungen in dem Material 4 kommt, welche durch eine Relativbewegung der fokussierenden Optik 2 relativ zum Material 4 einen Wellenleiter definieren.

[0035] Typische Pulsenergien liegen bei  $1 \text{ nJ}$  bis  $20 \mu\text{J}$ , wobei Schreibgeschwindigkeiten bei  $0,001 \text{ mm/s}$  bis  $1 \text{ m/s}$  liegen können. Beim Schreiben eines normalen Wellenleiters liegen die Wiederhol- beziehungsweise Repetitionsraten zwischen ungefähr  $100 \text{ Hz}$  bis  $200 \text{ MHz}$  bei Pulsdauern der eingestrahlten Lichtenergie von zwischen  $1 \text{ fs}$  und  $20 \text{ ps}$ , bevorzugteren Pulsdauern zwischen  $10 \text{ fs}$  bis  $200 \text{ fs}$  und mit den am bevorzugtesten Pulsdauern von  $50 \text{ fs}$  bis  $150 \text{ fs}$ . Die Fokusvolumina lagen im Bereich von ca.  $0,1 \mu\text{m}^3$  bis  $50 \mu\text{m}^3$ , vorzugsweise bei ca.  $1 \mu\text{m}^3$  bis  $10 \mu\text{m}^3$ .

[0036] Beim Schreiben mit der Optik 2 parallel zu einer der Hauptoberflächen 6 kann diese durch einen geeigneten Linearantrieb hochgenau in beiden orthogonalen in der Hauptoberfläche 6 liegenden Richtungen mit vordefinierter Geschwindigkeit verfahren werden.

[0037] Wie in Fig. 1b dargestellt, kann ein Wellenleiter auch senkrecht zur Hauptoberfläche 6 geschrieben werden, falls die in Fig. 1b dargestellte fokussierende Optik 7 mit deren Strahlrichtung parallel zur Hauptoberfläche 6 in Richtung der Eindringtiefe des von der fokussierenden Optik erzeugten Lichtkegels verschoben wird.

[0038] Typische planare Anordnungen, wie diese mit der in Fig. 1a dargestellten Anordnung erzeugbar sind, zeigen die Fig. 2a und 2b. Bei diesen Verzweigern wird zunächst ein erster Wellenleiter 8 und danach ein weiterer Wellenleiter 9 geschrieben. Der weitere Wellenleiter 9 überlagert im Bereich 10 des Wellenleiters 8, der vor dem Verzweigungspunkt 11 liegt, und wird durch Überschreiben des Wellenleiters 8 in diesem Bereich 10 erzeugt.

[0039] Obwohl in den Figuren nicht dargestellt, können abzweigende Strahlverläufe weiche Verrundungen aufweisen, um Streulichtanteile möglichst zu minimieren.

[0040] Während des Überschreibens des Abschnitts 10 kann die Schreibgeschwindigkeit erhöht, insbesondere verdoppelt sein oder alternativ die eingestrahlte Leistung vermindert, insbesondere halbiert sein.

[0041] Zur Verminderung der eingestrahlten Leistung kann die Repetitionsrate, die Pulsdauer und/oder die Pulsenergie jeweils allein oder in Kombination geändert werden. Auch eine Kombination aus geänderter Schreibgeschwindigkeit zusammen mit geänderter Pulsenergie und/oder Pulsdauer und/oder Wiederholrate liegt im Rahmen der Erfindung.

[0042] Auch der erste Wellenleiter 8 wird im Bereich 10 mit entsprechend verminderter Leistung und/oder entsprechend erhöhter Geschwindigkeit bis zum Verzweigungspunkt 11 geschrieben.

[0043] In Fig. 4 ist der in Fig. 2a schematisch dargestellte planare  $1 \times 2$ -Strahlteiler mit seinen realen Abmessungen und den erreichbaren Teilungsverhältnissen gezeigt. Zum Vergleich der Lichtintensitäten wurde in das transparente Material 4 zusätzlich zu dem ersten Wellenleiter 8 und dem

mindestens einen Wellenleiter 9 noch ein unverzweigter Wellenleiter 18 geschrieben, dessen Intensität der linken unteren Hälfte von Fig. 4 phänomenologisch entnehmbar ist.

[0044] Der rechten unteren Hälfte sind die Intensitäten der in den Wellenleitern 8 und 9 geführten optischen Signale zu entnehmen, welche große Übereinstimmung in deren Intensität zeigen.

[0045] Bei dem Schreiben dieser Wellenleiter wurde eine Pulsdauer des Laserpulses von  $80 \text{ fs}$ , eine Repetitionsrate von  $1 \text{ kHz}$  und eine Pulsenergie von  $1 \mu\text{J}$  verwendet. Die Fokussierung wurde mit einer  $10 \times$  Mikroskopoptik mit einer numerischen Apertur NA von  $0,25$  vorgenommen. Die Schreibgeschwindigkeit im Bereich 10 betrug ca.  $0,5 \text{ mm/s}$  und hatte in den abgezweigten Bereichen der Wellenleiter 8, 9 den Wert von ca.  $0,25 \text{ mm/s}$ .

[0046] Bei dem in Fig. 2b dargestellten planaren  $1 \times N$ -Wellenleiter werden anstelle eines einzigen weiteren Wellenleiters 9 eine Vielzahl von  $N - 1$  abgezweigten weiteren Wellenleitern geschrieben, welche zusammen mit dem ersten Wellenleiter insgesamt  $N$  verzweigte Ausbreitungswege definieren.

[0047] Beim Schreiben des  $1 \times N$ -Wellenleiters wird die Schreibgeschwindigkeit im Bereich 10 vorzugsweise im wesentlichen auf einen  $N$ -fachen Wert erhöht oder die eingestrahlte Leistung ca. um den Faktor  $N$  vermindert. Um

Nichtlinearitäten des Materials zu erfassen, kann die Verminderung der eingestrahlten Leistung und/oder die Erhöhung der Schreibgeschwindigkeit im Bereich 10 von einem Fachmann auch an andere Faktoren als  $N$  angepaßt werden, insbesondere so daß sich hierbei Wellenleiter mit geringem Streuverhalten und sehr exaktem Tellerverhältnis ergeben.

[0048] Ferner ist es nicht zwingend, daß das in die verzweigten Arme eintretende Licht zwischen allen diesen Armen exakt das gleiche Teilverhältnis aufweist, denn es können hierbei durch Änderung der Schreibgeschwindigkeit und/oder der eingestrahlten Leistung auch verschiedene andere erwünschte Teilverhältnisse vordefiniert erzeugt werden.

[0049] In Fig. 3 ist schematisch in Form von quadratischen und runden Punkten angedeutet, wie die im ersten Schritt eingestrahlten Laserpulsfolge 12 und die im zweiten Schritt eingestrahlten Laserpunktfolge 13 räumlich angeordnet ist.

[0050] Im Gegensatz zur korrekten schematischen Dar-

stellung aus **Fig. 3** und nur um der Klarheit willen sind im Bereich des Wellenleiterabschnitts **10** die Punktfolgen **12** und **13** nicht übereinander sondern nebeneinander dargestellt, wobei jedoch diese Pulsfolgen im Abschnitt **10** bei den wirklichen Ausführungsformen übereinanderliegend angeordnet sind. Zur Verdeutlichung sind die änderbaren Schreibparameter, die Schreibgeschwindigkeit, die Pulsenergie, die Pulsdauer und die Wiederholrate in dieser Figur nochmals dargestellt.

[0051] Hierbei stellen jeweils die quadratischen Punkte die Pulsfolge mit erhöhter Schreibgeschwindigkeit und/oder verminderter eingestrahlter Leistung dar und die runden Punkte die Pulsfolge mit niedrigerer Schreibgeschwindigkeit und/oder höherer eingestrahlter Leistung dar.

[0052] In **Fig. 2c** ist ein dreidimensionaler  $1 \times 3$  Strahlteiler gezeigt, welcher sich von dem in **Fig. 2a** dargestellten Strahlteiler im wesentlichen auch dadurch unterscheidet, daß nach dem Verzweigungspunkt **11** zusätzlich zu dem ersten Wellenleiter **8** und dem weiteren Wellenleiter **9** ein nochmals weiterer Wellenleiter **14** geschrieben wurde, welcher nicht in der durch die Wellenleiter **8** und **9** aufgespannten Ebene liegt sondern aus dieser Ebene schräg nach hinten verläuft, dies bedeutet in einer größeren Tiefe innerhalb des optischen transparenten Materials liegt als die Wellenleiter **8** und **9**.

[0053] In **Fig. 2d** ist zusätzlich zu dem nochmals weiteren Wellenleiter **14** ein weiterer Wellenleiter **15** dargestellt, der vom Verzweigungspunkt **11** ausgehend schräg nach oben, dies bedeutet in eine geringere Schreibtiefe hinein verläuft.

[0054] Es liegt im Rahmen der Erfindung, weitere Wellenleiter, die beispielsweise den Rand eines Kreises oder eines gedachten Ellipsoids **16** berühren in das transparente Material einzubringen, um gleiche Phasenlaufzeiten oder definierte Phasenlaufzeitdifferenzen des optischen Signals zu erzeugen.

[0055] Ferner können Gruppen von verzweigten Wellenleitern jeweils diesen Gruppen zugeordnete Kreise oder Ellipsoide berühren.

[0056] Zur Erläuterung eines beliebigen Schreibverlaufs wird nachfolgend auf **Fig. 5** verwiesen, in welcher die Anordnung **1** nochmals detaillierter dargestellt ist.

[0057] Relativ zur Hauptoberfläche **6** des transparenten Materials **4** wird ein beliebiger Wellenleiter **17** geschrieben, dessen Tiefe, das bedeutet Abstand in Z-Richtung zur Hauptoberfläche **6** örtlich variiert.

[0058] In Abhängigkeit von der Tiefe des Fokuspunktes **5** werden die Schreibparameter zusammen mit der Änderung der Schreibtiefe geändert. Zur Beibehaltung der Strahlführungsqualität des späteren Wellenleiters **8**, **9**, dies bedeutet des erzeugten Brechungsindexunterschiedes sowie zur Vermeidung von unerwünschten Streuverlusten wird die eingestrahlte Leistung bzw. die Pulsenergie pro Puls und/oder die Wiederholfrequenz und/oder die Pulsdauer so geändert, daß bei größerer Tiefe mehr eingestrahlte Leistung zur Verfügung gestellt wird.

[0059] Alternativ oder zusätzlich werden die durch die Brechung an der Hauptoberfläche **6** entstehenden sphärischen Aberrationen korrigiert.

[0060] Hierzu ist eine in **Fig. 6** dargestellte Schwarzschildoptik **19** mit relativ zueinander verschiebbar angeordneten Spiegeln **20**, **21** verwendbar. Bei Verschiebung der Spiegel **20**, **21** in der mit **x** bezeichneten Achse relativ zueinander werden definierte, von einer sphärischen Phasenfront abweichende Deformationen des zu fokussierenden Wellenfeldes der Laserlichtpulse erzeugt, welche zumindest einen Teil der sphärischen Aberration kompensieren, die durch die Brechung des Lichtes an der Hauptoberfläche **6** des Materials **4** entstehen.

[0061] Somit kann im wesentlichen jeder Tiefe **t** des Fokus **5** innerhalb des Materials **4** eine Verschiebung **x** zugeordnet werden, welche eine optimierte Korrektur gestattet. Durch gleichzeitige Nachführung der Verschiebung **x** bei Veränderung der Tiefe **t** des Fokus **5** können in Echtzeit Korrekturen vorgenommen werden und die Qualität der erzeugten Wellenleiter auch in großen Tiefen aufrecht erhalten werden. Auf diese Weise können Fokustiefen von mehr als 4 cm realisiert werden.

[0062] In einer anderen, in den Figuren nicht dargestellten Ausführungsform der fokussierenden Optik kann die sphärische Aberration innerhalb eines Linsensystems kompensiert werden, bei welchen einzelne Linsen des Linsensystems relativ zu anderen verschiebbar sind.

[0063] Alternativ kann ein mechanisch deformierbarer Spiegel Verwendung finden, dessen Krümmung durch mechanische Aktuatoren änderbar ist und welcher in den Figuren nicht näher dargestellt ist.

[0064] Es kann ferner auch eine spiegelnd bedampfte dünne Trägerfolie eingesetzt werden, die beispielsweise durch Unterdruck oder elektrostatische Kräfte in deren Wölbung verändert wird.

[0065] In überraschender Weise war die Erfindung nicht auf einzelne Gläser beschränkt sondern ließ sich im Wesentlichen bei vielen transparenten Materialien, wie beispielsweise Gläsern, Glaskeramiken und Kristallen realisieren.

[0066] Wesentlich war, daß das Material bei der eingestrahlten Schreibwellenlänge und bei der Wellenlänge des geführten Lichtes transparent ist. Im Wesentlichen transparent bedeutet im Sinne der Erfindung, daß so wenig Absorption vorhanden ist, daß eine Brechungsindexänderung während des Schreibvorgangs eintritt und daß der geschriebene Wellenleiter, je nach dessen späteren Verwendung für den Strahlteiler noch ausreichend brauchbar ist.

[0067] Folglich ist in den meisten Fällen ein Material dann noch im Wesentlichen transparent, wenn durch Absorption auftretende Verluste insgesamt bei weniger als 20%, vorzugsweise weniger als 5% und am bevorzugtesten bei weniger als 1% liegen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, bei welchem in ein durch Lichteinstrahlung änderbares Material ein erster Wellenleiter und mindestens ein weiterer, von dem ersten Wellenleiter abzweigender Wellenleiter geschrieben wird, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Schreiben des mindestens einen weiteren Wellenleiters (**9**) ein Teil der vor einem Verzweigungspunkt (**11**) liegenden Strecke (**10**) des ersten Wellenleiters (**8**) überschrieben wird.

2. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Schreiben des mindestens einen weiteren Wellenleiters (**9**) die vollständige, in dem durch Licht änderbaren Material (**4**) liegende Strecke (**10**) des ersten Wellenleiters (**8**) bis zum Verzweigungspunkt (**11**) überschrieben wird.

3. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Änderung des Materials (**4**) durch Lichtpulse mit Pulsdauern im Bereich von Femtosekunden Brechungsindexänderungen hervorgerufen werden, welche den einen und den mindestens einen weiteren Wellenleiter (**8**, **9**) ausbilden.

4. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtpulse Pulsdauern zwischen 1 fs und 20 ps, bevorzugt Pulsdauern zwischen 10 fs bis 200 fs und am bevorzugtesten Pulsdauern von 50 fs bis 150 fs aufweisen. 5
5. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß während des Überschreibens des ersten Wellenleiters (8) die Schreibgeschwindigkeit gegenüber der Schreibgeschwindigkeit beim Schreiben des abgezweigten Teils (9) des mindestens einen weiteren Wellenleiters (9) erhöht wird. 10
6. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schreibgeschwindigkeit bei dem Überschreiben des ersten Wellenleiters (8) in einem Bereich von 0,001 mm/s bis 1 m/s liegt und bei dem Schreiben des abgezweigten Teils des mindestens einen weiteren Wellenleiters (9) bei einem N-fach Strahlteiler auf etwa das N-fache der Schreibgeschwindigkeit beim Schreiben des abgezweigten Teils angehoben wird. 15
7. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach einem der vorstehenden Ansprüche von 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß während des Überschreibens des ersten Wellenleiters (8) die eingestrahlte Lichtleistung, insbesondere bei einem N-fach Strahlteiler auf den Nten Teil, gegenüber der eingestrahlten Lichtleistung bei dem Schreiben des abgezweigten Teils des mindestens einen weiteren Wellenleiters (9) vermindert wird. 20
8. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Repetitionsrate der Pulse bei dem Schreiben der Wellenleiter (8, 9) zwischen 10 Hz und 200 MHz liegt. 25
9. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, insbesondere nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das durch Licht änderbare Material (4) aus der Gruppe ausgewählt ist, die Gläser, Kristalle und Glaskeramiken umfasst, welche bei einer Schreibwellenlänge im Bereich von 300 nm bis 1700 nm, besonders bevorzugt bei einer Schreibwellenlänge von ca. 400 nm, ca. 620 nm, ca. 800 nm, ca. 1060 nm und/oder ca. 1550 nm und bei der Wellenlänge des geführten Lichtes vorzugsweise im Bereich von 1250 nm bis 1600 nm im wesentlichen transparent sind. 30
10. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Schreiben der Wellenleiter (8, 9) parallel zur Oberfläche (6) des durch Licht änderbaren Materials (4) erfolgt. 35
11. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach einem der vorstehenden Ansprüche von 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Schreiben von zumindest einem Teil der Wellenleiter (14, 15) Abschnitte definiert werden, welche nicht parallel zu der Oberfläche (6) des durch Licht änderbaren Materials (4) verlaufen. 40
12. Verfahren zur Herstellung eines optischen Ver-

- zweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Schreiben von zumindest einem Teil der Wellenleiter (14, 15) schräge Anteile relativ zur Oberfläche (6) des durch Licht änderbaren Materials (4) mit ver rundeten Übergangsberichen ausgebildet werden. 45
13. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß Gruppen von Wellenleitern (8, 9) geschrieben werden, welche Abschnitte aufweisen, die jeweils in einer gemeinsamen Ebene liegen. 50
14. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenleiter (8, 9, 14, 15) in einer Tiefe von bis zu 4 cm liegen. 55
15. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Korrektur der sphärischen Aberration der Wellenleiter (8, 9, 14, 15) schreibenden Optik (2, 7) in Abhängigkeit von der Tiefe des Wellenleiters (8, 9, 14, 15) in dem durch Licht änderbaren Material (4) vorgenommen wird. 60
16. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrektur der sphärischen Aberration mittels eines Spiegels mit änderbarer Kontur, insbesondere änderbarer Krümmung, von dessen Oberfläche vorgenommen wird. 65
17. Verfahren zur Herstellung eines optischen Verzweigers, insbesondere eines Mehrfach-Strahlteilers, nach einem der Ansprüche von 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß eine Anpassung der pro Puls eingesetzten Energie in Abhängigkeit von der Tiefe des Wellenleiters (8, 9, 14, 15) in dem durch Licht änderbaren Material (4) vorgenommen wird. 70
18. Optischer Verzweiger, insbesondere Mehrfach-Strahlteiler, mit einem ersten Wellenleiter (8) und mindestens einem weiteren, von dem ersten Wellenleiter (8) abzweigenden Wellenleiter (9), gekennzeichnet durch dessen Herstellung nach einem der vorstehenden Ansprüche. 75
19. Optisches Kommunikationssystem gekennzeichnet durch einen optischen Verzweiger nach Anspruch 18.

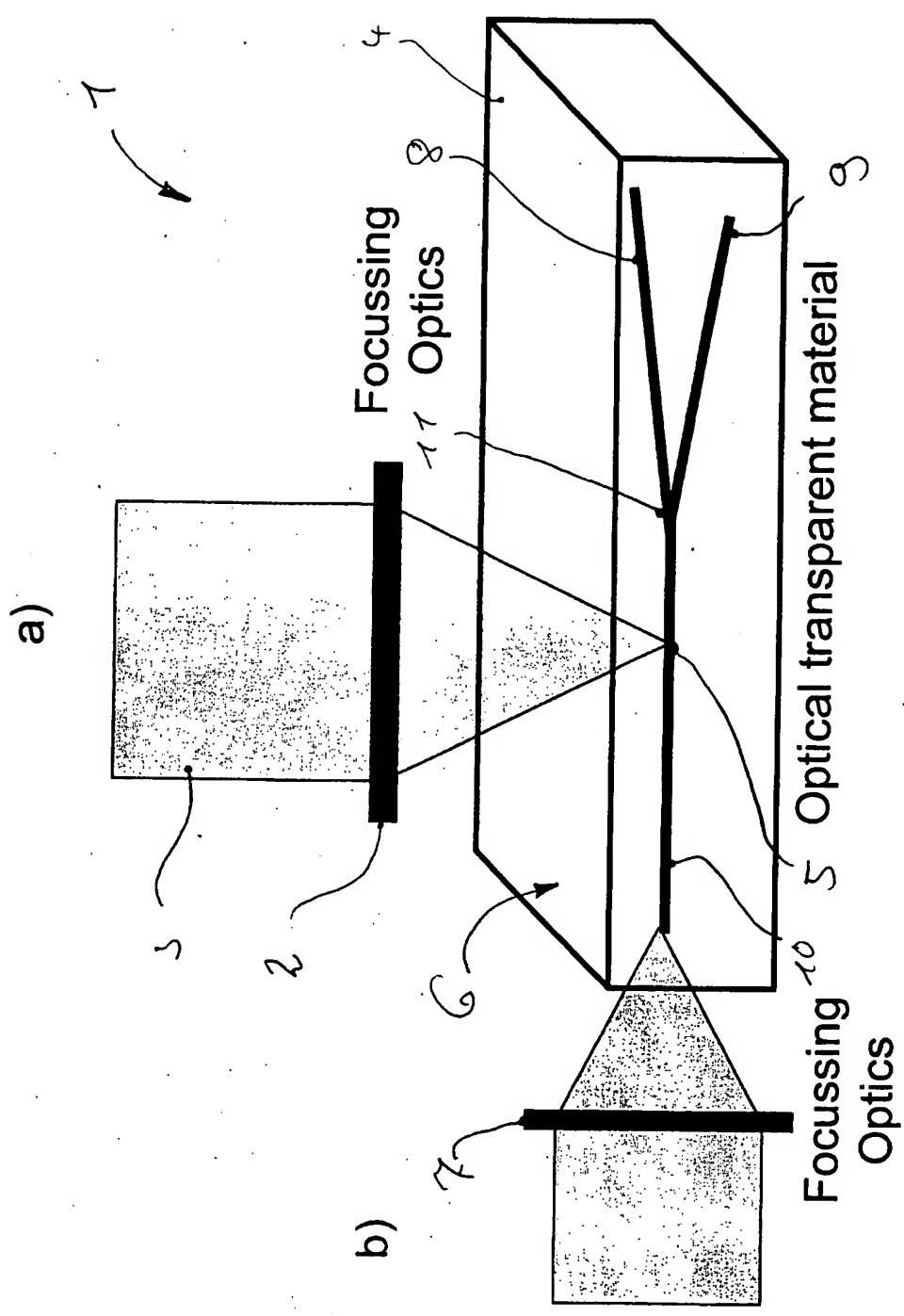
---

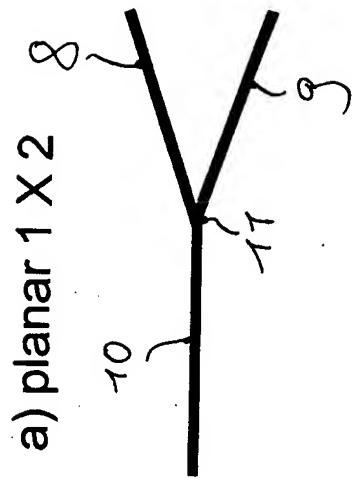
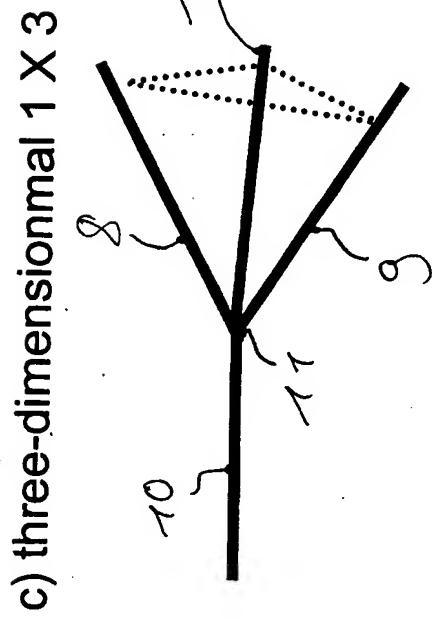
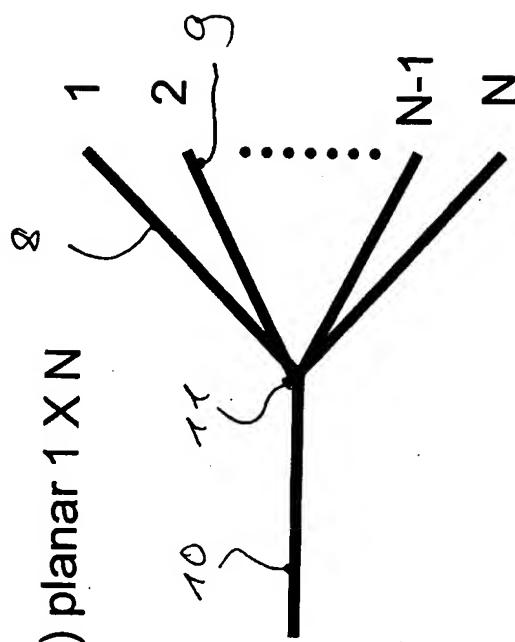
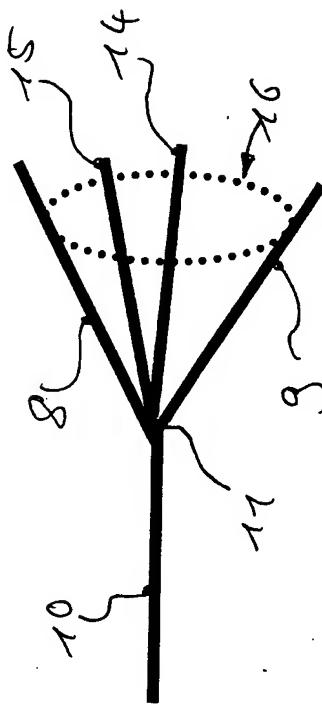
Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

Fig. 1: Setup for Direct Waveguide Writing



**Fig. 2: Splitter examples**b) planar  $1 \times N$ 
d) three-dimensionnal  $1 \times N$ 


**Fig. 3: Splitter Writing Method  
(Example 1 X 2 Splitter)**

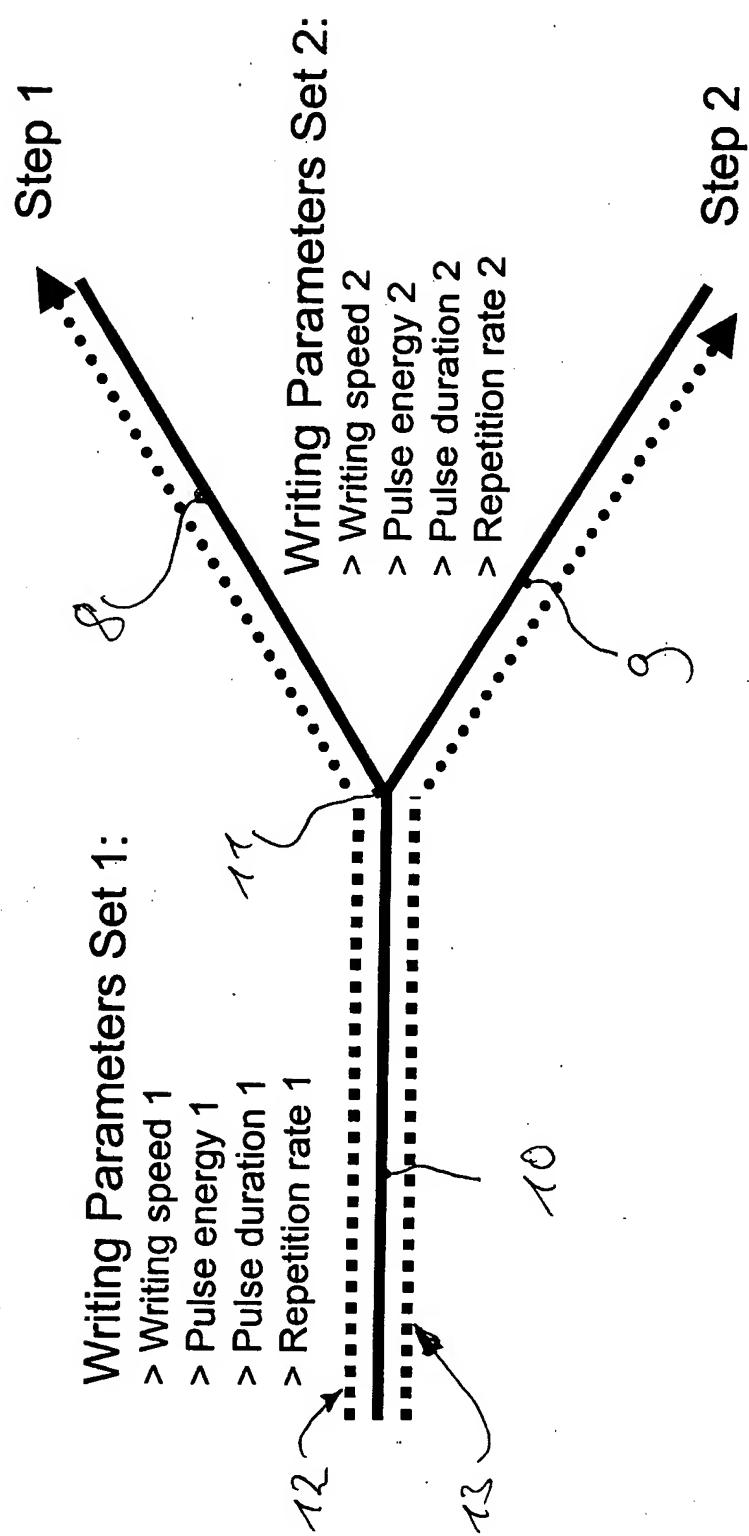
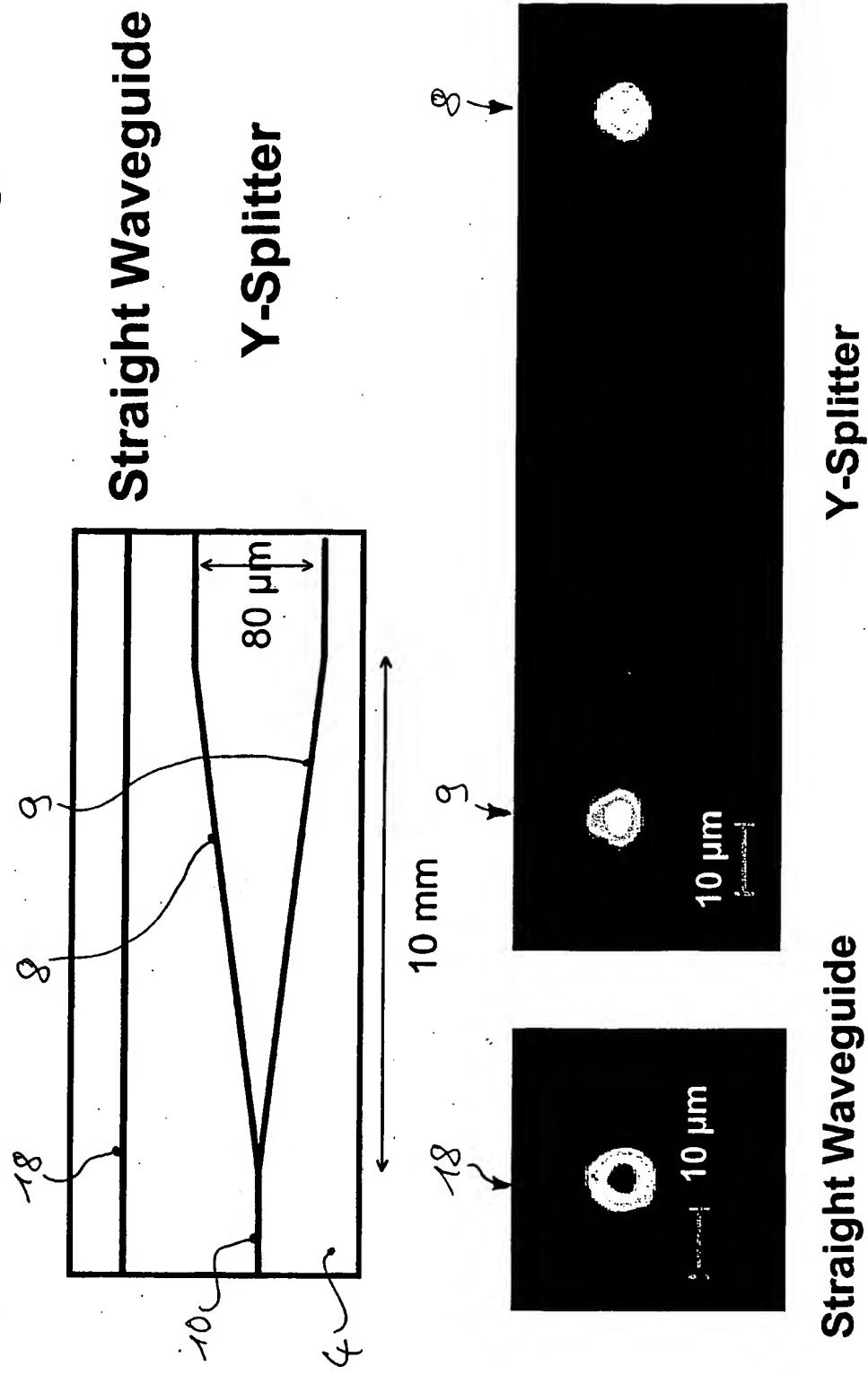


Fig. 4: Planar Y-Splitter written in soft silica glass



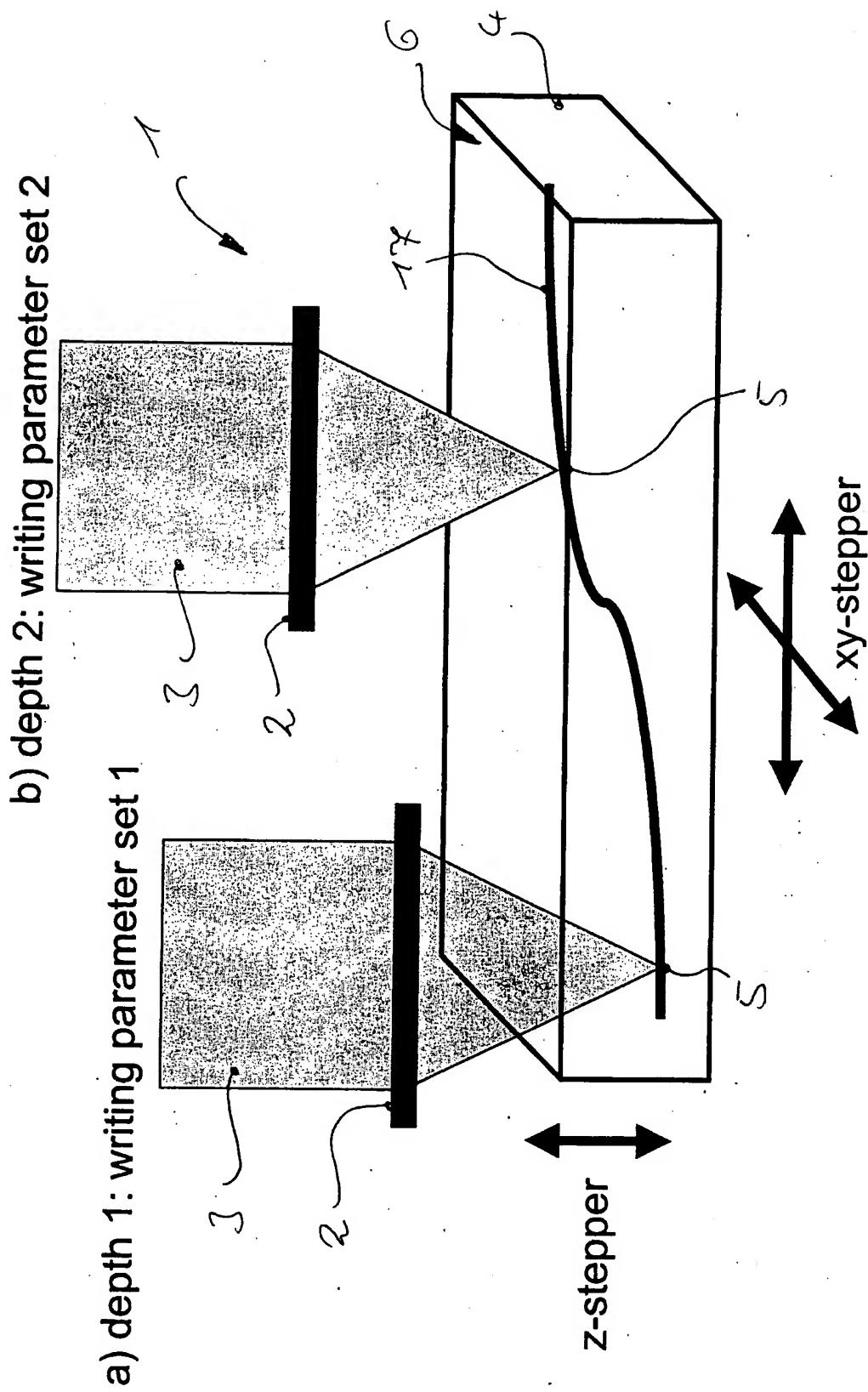
**Fig. 5: 3D Writing Method**

Fig. 6

